

대면적 OLED증착용 서큘러소스의 성능개선

엄태준^{1*}, 주영철¹, 김국원¹, 이상욱¹

Performance Improvement of Circular Source for Large Size OLED vapor deposition

Tai-Joon Um^{1*}, Young-Cheol Joo¹, Kug-Weon Kim¹ and Sang-Wook Lee¹

요 약 유기발광다이오드(OLED)증착을 위한 서큘러소스의 열전달 해석을 통하여 온도분포를 연구하였다. 대면적의 OLED용 평판의 유기물증착을 위해 서큘러소스가 사용되는데, 소스내의 유기물이 가열되고, 승화되어 증착된다. 유기물의 수율을 높이기 위해 히터설계를 개선하고, 이에 대한 열전달해석을 수행하였다. 그리고, 효율을 높이기 위한 새로운 제조공정인 OVPD공정의 개념과 유도 및 열전달특성에 관한 기본적인 연구결과를 제시하였다.

Abstract Temperature distribution of the circular heat source was studied by analyzing the heat transfer of the environment of the circular source for OLED. Circular nozzle source was used to fabricate thin organic layer as the organic material in it was heated, vaporized and deposited to the large size flat panel. Circular source for large size fat panel for OLED has been modified to obtain higher productivity and heat transfer characteristics was predicted using computer simulation. Fundamentals for OVPD process also was presented to estimate flow and heat transfer characteristics of the process which can increase the material efficiency.

Key Words : OLED, 증착, 서큘러소스, 온도분포해석, OVPD

1. 서론

유기발광다이오드(OLED)는 다른 디스플레이에 비해 응답속도가 빠르고, 밝으며, 스스로 발광하여 무게와 두께를 작게 할 수 있는 정점이 있다. 반면에 평판을 크게 하는 기술이 아직 개발 중에 있는 실정이다. 제조공정상에서 과제중의 하나는 증착작업시 유기물의 증착효율을 높이는 것이다. 평판이 대면적화 할수록 유기물층의 균일화와 유기물의 수율을 높이는 기술이 요구되고 있기 때문이다.

서큘러노즐소스는 Alq₃같은 유기물을 평판에 박막으로 증착하는데 열원으로 사용된다(그림 1). 크루시블(crucible, 도가니)안에 있는 유기물은 고진공환경에서 250~300℃로 가열되고, 승화되어 평판에 물리적으로 증착된다. 흑연소재의 크루시블은 바깥부분의 하우징에 의

해 보호되고 있다. 가열을 위한 일반적인 히터는 응축된 유기물이 크루시블에 달라붙지 않도록 윗부분에 위치하고 있다. 히터의 온도는 온도제어기에 의해 조절되는데, 유기물의 양에 따라 적절한 온도곡선을 유지하도록 하고 있다. 유기물이 승화될수록 크루시블 아래 부분까지 열전달이 되도록 온도를 증가시키게 된다.

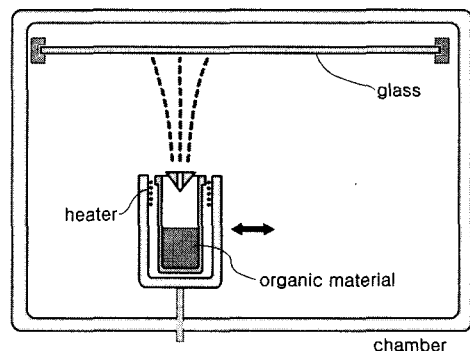


그림 1. 서큘러 소스

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-02) 지원으로 수행되었음.

¹순천대학교 기계공학과

*교신저자: 엄태준(tjoonum@sch.ac.kr)

4세대 평판의 증착을 위해서는 보다 큰 서큘러소스가 필요하다. 또 소스 한 개로는 충분하지 않기 때문에 대면적의 평판을 증착하기 위해서는 여러 개의 서큘러소스가 필요할 수도 있다.

효율을 높이기 위한 방법 중의 하나로 리니어소스를 들 수 있다. 리니어소스의 설계에 대해서는 많은 연구가 진행 중에 있다. 여러 개의 서큘러소스를 배치한 경우도 있고, 기다란 슬롯형태를 가진 경우도 있다.

최근에 소개된 OVPD(organic vapor phase deposition) 공정은 유기물증착의 효율성을 높이기 위해 질소같은 불활성기체의 유동을 이용하여 유기물을 이송하는 방법을 사용하는 것으로 알려졌다[1].

본 논문은 유기물의 수율을 높이기 위해서 서큘러소스의 히터구조의 새로운 개념설계를 제시하고, 이에 대한 열전달을 해석하였다. 아울러 OVPD공정의 기초적인 유동과 열전달 시뮬레이션도 실시하였다.

2. 서큘러소스의 설계개선

2.1 기존설계

평판에 유기물을 균일하게 증착하기 위해서 서큘러소스를 사용하는데, 유기물 가열에 쓰이는 히터의 기존구조는 그림 2와 같이 상부에 집중적으로 배치되어 있다. 즉, 크루시블과 하우스사이 공간 위부분에 자리잡고 있어 유기물이 응축되지 못하도록 하는 데에 초점이 맞추어져 있다[2,3].

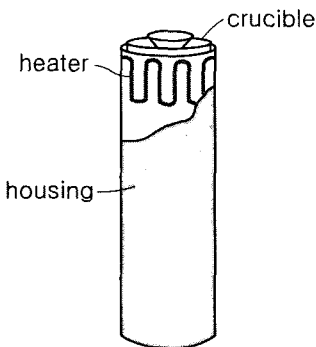


그림 2. 기존의 히터구조

그림 2에서 볼 수 있듯이 지그재그형상의 코일이 위부분에 배치되어 있어 열이 위부분에만 집중될 가능성이 있어 이에 대한 개선안이 필요하다고 판단된다.

히터 재질은 탄탈(Ta)이 사용되고 있다. 탄탈의 실제 비저항은 히터코일의 저항을 측정하여 확인할 수 있다.

확인된 비저항은 $2.2 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ 이다. 소비전력은 10V가 인가되었을 때, 36W정도이다.

표 1. 히터의 물성치

항목	물성치
소재	탄탈(Ta)
비저항	$2.2 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$
최대 작동온도	500 °C
온도센서	열전대
동력	20V 10A

2.1 히터 개선설계

새로 제안된 히터코일은 3개의 코일을 상하로 배치하는 것이다(그림 3). 각각의 코일은 온도제어를 통하여 다르게 제어할 수 있으므로 필요한 온도분포를 얻는 것이 보다 용이할 것으로 생각된다.

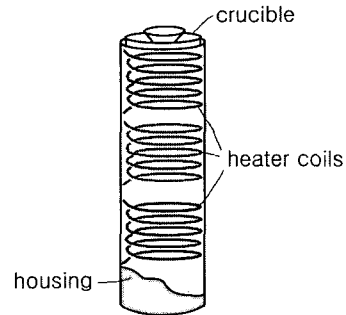


그림 3. 제안된 히터설계

3. 열전달 해석

3.1 모델링

서큘러소스의 온도분포를 일반적인 CFD(전산유체역학)프로그램을 이용하여 시뮬레이션하였다. CFD해석의 첫째 과정은 대상물의 모델링 및 메쉬를 생성하는 것이다. 이를 위해 본 논문에서는 GAMBIT 프로그램을 사용하였다.

개선전 히터와 개선후 히터에 대한 시뮬레이션을 각각 수행하여 열에너지를 비교하였다. 서큘러소스의 형상은 대칭이므로 계산시간과 메모리를 절약하기 위해 r-z평면의 2차원으로 모델링하였다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 기존 설계의 히터는 상단부분에 1개가 설치되어 있다.

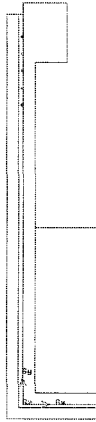


그림 4. 기존 히터설계에 대한 모델링

그림 5는 개선된 히터 설계를 보여주고 있는데, 상·중·하 3개의 히터가 설치되어 있어서 각각의 히터에 열 에너지를 따로 공급할 수 있도록 되어 있다.

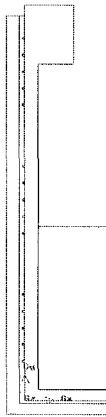


그림 5. 개선된 히터 설계에 대한 모델링

열은 히터코일에 의해 균일하게 발생하는 것으로 가정하였다. 전도에 의해 크루시블을 통하여 유기물인 고분자 분말에 전달된다. 유기물분말의 중심선은 대칭이므로 단 열되는 것으로 본다. 크루시블 위부분의 안쪽은 분말과 접촉하지 않는 부분으로 열복사로 크루시블 반대편에 복사 에너지를 전달한다. 그런데, 반대편에서도 같은 에너지가 복사되므로 크루시블 벽은 단열로 볼 수 있다. 하우징 안쪽으로는 히터로부터 열이 복사된다.

고진공상태이므로 공기에 의한 전도는 거의 무시할 만하다. 주위 공기의 밀도는 10⁹배 이상 작기 때문이다. 하우징 재질은 4겹으로 되어있어 열전도도는 아주 작다. 하우징 외벽으로부터는 상온의 대기로 복사에 의해 발산되는 것으로 가정하였다.

서클러소스에 대한 지배방정식은 2차원 전도방정식으로 다음과 같다.

$$k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q} = 0 \quad (1)$$

여기서 T 는 온도, k 는 각 부분의 열전도계수, \dot{q} 는 히터의 열발생율이다. 하우징벽의 방사율은 매끄러운 점을 고려하여 0.17을 사용하였다. 히터의 열에너지는 8000~12000 w/m³, 주변온도는 20℃로 가정하고, 시뮬레이션하였다.

표 2는 개선된 설계의 모델링에서 사용된 메쉬 개수와 각 부분의 재질을 나타내고 있다.

표 2. 메쉬 개수 및 각 부분의 재질

부분	메쉬형태	개수	재질
분말	사변형	1298	고분자
크루시블	사변형	689	흑연
공기	삼각형	1050	공기
하우징	삼각형	2508	강(단열)
합계		5455	

3.2 온도분포

시뮬레이션 결과에 의한 서클러소스의 온도분포가 그림 6과 7에 각각 보이고 있다. 그림 6은 개선 전 설계에 대한 온도분포이고, 그림 7은 개선 후 설계에 대한 온도 분포이다. 그림 6에서는 유기물 분말 상부의 온도가 300℃가 되도록 하기 위해서는 1개인 히터에 공급하는 열 에너지를 12000 w/m³가 필요하였다.

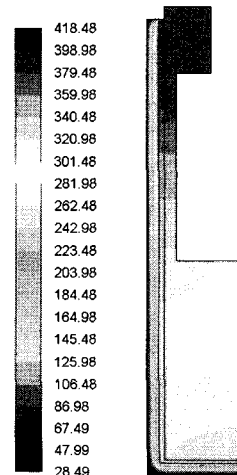


그림 6. 온도분포(기존설계 해석결과)

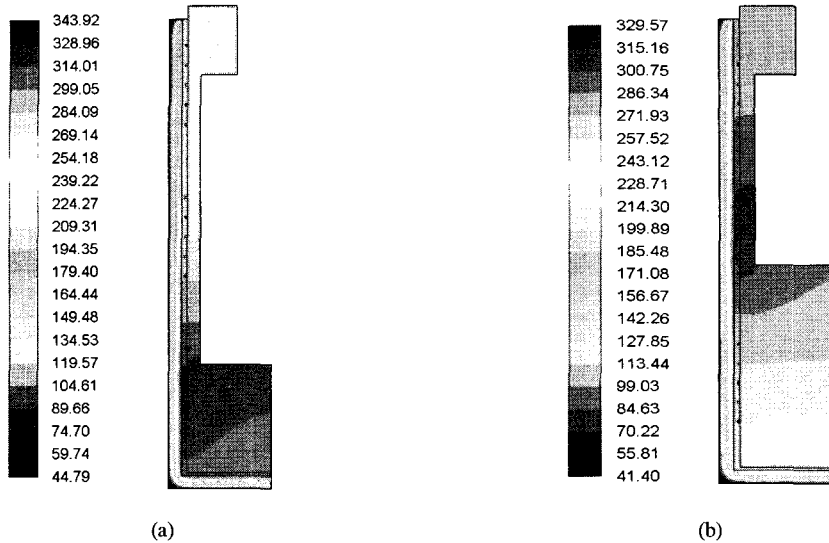


그림 7. 온도분포(개선설계 해석결과)

반면에 그림 7의 온도분포 해석을 통하여 확인한 결과, 개선된 설계에서는 작은 열에너지로도 같은 온도를 유기물에 공급할 수 있다. 그림7 (a)는 중단에 있는 히터를 가열하였을 때의 온도분포이고, 이 때 필요한 열에너지는 9000 w/m^3 이다. 그림7 (b)는 하단에 있는 히터를 가열하였을 때의 온도분포이고, 이 때 필요한 열에너지는 8700 w/m^3 에 불과하다.

유기물 위 표면의 온도는 분말의 승화가 일어나는 온도인 약 300°C 이다. 유기물 분말의 열화를 방지하기 위해서 유기물의 아래 부분의 온도는 300°C 보다 낮도록 제어되어야 한다. 승화된 유기물증기의 응축을 막기 위해서 크루시블의 위 부분은 약 270°C 로 제어되어야 한다. 하우징 재질은 잘 단열되어 있으므로 하우징 외벽의 온도는 주위온도보다 약간 높는데, 이는 히터코일에서 발생한 열이 유기물을 승화시키는데, 유효하게 사용됨을 나타낸다.

4. OVPD 개념

4.1 OVPD 소개

일반적으로 OLED용 박막($<1000\text{nm}$)은 제품이 고성능을 발휘하기 위하여 순도, 형상 및 구조의 품질상태를 높일 수 있는 진공 열증착 방법(VTE)을 사용하여 제조한다. 그런데, 실제로 박막두께의 균일도와 대면적에 걸친 유기물 농도의 균등성을 유지하는 것은 쉽지 않다. 또, 많은 유기물이 증착실 내벽에 붙고 이는 결과적으로 수율

을 저하시키고 부스러기로 떨어져 시스템을 오염시키게 된다. 따라서 생산성이 낮아지고, 제조원가를 높게 한다. OVPD(organic vapor phase deposition)는 저압환경하에서 대면적 유기물 증착에 사용되는 방법으로 높은 증착효율, 빠르고 균일한 증착 등의 장점이 있다.

OVPD공정은 그림 8에 보이고 있다. 이 기법은 고온의 불활성기체를 이용하여 유기물분자를 반송하여 낮은 온도의 평판에 증착되는 방법을 사용한다. 증착챔버는 유기물의 평형응축온도보다 높게 유지한다. 한편, 평판은 비결정의 박막을 형성하도록 낮은 온도를 유지한다. 박막두께는 평판 앞에 위치한 기계적 셔터로 제어하거나 반송가스의 흐름을 조절하여 제어하고, 두 방법을 함께 사용하여 제어하기도 한다. 평판을 제외한 다른 부분의 표면 온도를 응축온도보다 높게 유지하여 유기물이 붙지 않도록 함으로써 재료의 수율을 높일 수 있다.

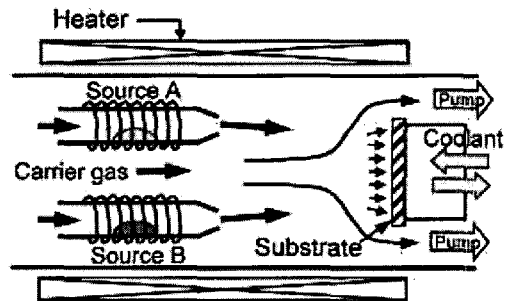


그림 8. OVPD공정의 개념도

4.2 이송현상 고찰

OVPD의 반응은 분자운동측면에서 진공열증착과 많이 다르다. 그 차이는 분자평균 자유경로의 크기차이 때문이다.

$$mfp = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \cdot \pi d^2 \cdot P_{dep}} \quad (2)$$

여기서 k_B 는 볼츠만 상수, T 는 불활성 가스의 온도, πd^2 는 직경이 인 두 분자간의 유효충돌면적이다. 25°C에서 진공열 증착의 경우, 진공압력 10⁻⁶ Torr에서 직경이 $d = 3.25 \text{ \AA}$ 인 질소의 $mfp > 50 \text{ cm}$ 이다. 반면에 OVPD의 경우는 $P_{dep} = 0.1 \sim 10 \text{ Torr}$ 에서 $mfp \approx 100 \sim 1 \text{ \mu m}$ 이다. 따라서, 연속체 해석이 챔버크기의 반송이해에 도움이 되므로 OVPD의 거동예측을 위해서는 평판근처의 분자반송 현상이 고려되어야 한다.

누센넘버(Knudsen Number) K_n 는 여러 가지 다른 반송현상의 특징을 파악하기 위해 자주 쓰이는데, mfp 와 장치크기 L 의 비로 표시된다($K_n = mfp/L$). 장치크기 L 은 보통 누센넘버가 분자간 충돌빈도와 분자와 벽간의 충돌빈도의 비로 표시되도록 정한다. 패턴이 없는 OVPD의 경우, $L \approx 1 \sim 100 \text{ cm}$ (대략 챔버의 직경)이고 $mfp \approx 1 \sim 10^3 \text{ \mu m}$ 이다. 그러므로, 누센넘버는 $K_n \ll 1$ 이 되고 박막증착을 이해하는데, 연속체 모델이 사용될 수 있다. 그런데 박막 패턴이 있는 경우는 장치의 크기를 고려할 때, 틈이 중요한 치수가 된다. 이 경우, 유효한 증착 압력범위에서 $L \approx 1 \sim 100 \text{ \mu m}$ 이고, $0.1 < K_n < 10$ 이 된다. 이 때는 가스유동의 이산분자특성이 무시될 수 없다.

4.3 유동 해석

OVPD의 증착공정의 유동역학을 조사하기 위해서 그림 9에 보이는 단순화한 증착형상의 유동패턴을 유한요소방법으로 모델링하였다. 유동에 대한 나비에-스톡스 방정식을 수치적으로 해석하였다. 소스에서 평판까지의 압력강하는 충분히 작아(10%) 비압축성유체로 가정할 수 있고, 유기물의 농도는 1%로 작아 반송가스의 유동역학에 영향을 주지 않는다. 물리적 파라미터와 경계조건은 참고문헌의 있는 값들과 상응하였다. 그림 9의 (b)는 유한요소모델과 온도 경계조건을 보여주고 있다. 유한요소 해석은 ANSYS의 FLOTTRAN CFD로 수행하였다. 증착 챔버내의 유동의 스트림라인과 온도분포도 시뮬레이션하였다[5]. 온도분포는 그림 9(c)에 보이고 있다. 그림 9의 (d)와 (e)는 냉각된 평판 주위의 온도와 유동을 상세하게

보여주고 있다. 두 그림 모두 평판 주위의 유동역학과 경계조건을 시각화하는데 도움이 된다.

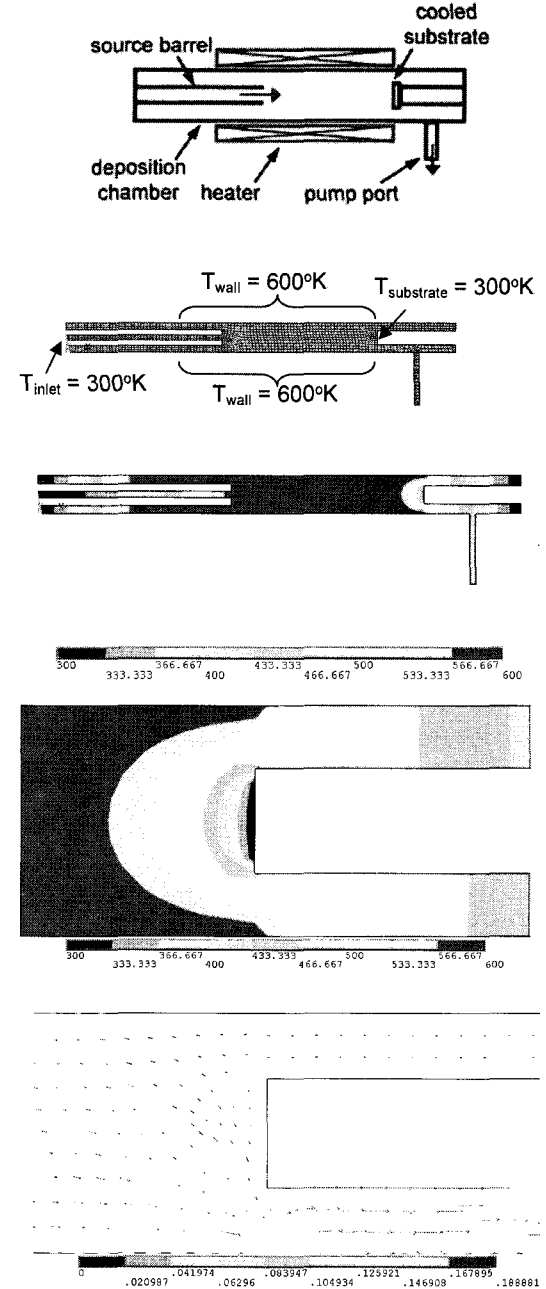


그림 9. (a)유동의 수치모델링에 사용된 OVPD장치의 형상 (b)ANSYS에 의한 유한요소 모델링 (c)온도분포 (d)냉각된 평판주위의 자세한 온도분포 (e)냉각된 평판주위의 자세한 유동

5. 결론

본 논문에서는 OLED용 대면적 평판의 유기물 증착을 위해 사용되는 서큐러소스의 히터설계를 개선하여 제어를 용이하게 하고 효율을 높이도록 하였다. 새로 제안된 설계에 대하여 열전달해석을 통하여 온도분포를 시뮬레이션하였다.

상용의 CFD(전산유체역학)프로그램을 이용하여 소스의 온도분포를 시뮬레이션하여 히터설계의 타당성을 검증하였다. 1개의 히터를 상부에 설치한 개선 전 설계와 3개의 히터를 배치한 개선 후 설계를 각각 시뮬레이션하여 비교함으로써 개선 후 히터에 공급하는 열에너지를 3000 w/m² 정도 줄일 수 있는 것을 확인하였고, 향후 상설설계자료로 활용할 수 있을 것으로 보인다. 이 결과는 또 후후 실험결과와 비교할 수 있는 자료로 활용할 수 있다.

OVPD공정개념을 소개하였고, 누센넘버의 범위를 확인하여 유동해석을 실시하였다. 유한요소해석방법을 사용하여 챔버내의 유동과 온도분포를 구하였다. 이 결과는 OVPD기법을 대면적 평판증착에 적용하는데 사용될 수 있다.

참고문헌

- [1] Himcinschi, C. et al, "Thin organic heterostructures deposited via organic vapor phase deposition: spectroscopic ellipsometry characterization," J. of Crystal Growth, pp. 1035 ~ 1040, 2005
- [2] M. A. Baldo, M. Deutsch, P. E. Burrows, H. Gossenberger, M. Gersten-berg, V. S. Ban, and S. R. Forrest, Adv. Mater., 10, 1505, 1998.
- [3] M. Shtein, P. Peumans, J. B. Benziger, and S. R. Forrest, J. Appl. Phys., 93, 4005, 2003.
- [4] M. Shtein, H. Gossenberger, J. Benziger, and S. Forrest, J. Appl. Phys., 89, 1470, 2001.
- [5] ANSYS, Release 9.0, Swanson Analysis System Inc., Houston PA.
- [6] Dobbertin, T. et al, "OLED matrix displays: in-line process technology and fundamentals," Thin Solid Films, vol. 442, pp.132~139, 2003.
- [7] Burrows, P. et al, "Organic vapor phase deposition: a new method for the growth of organic thin films with large optical non-linearities," J. of Crystal Growth, vol 156, pp.91~98, 1995.
- [8] Wong, F. et al, "Performance enhancement of organic light-emitting diode by heat treatment," J. of Crystal

엄 태 준(Tai-Joon Um)

[정회원]



- 1977년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1979년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1989년 5월 : 오클라호마 주립대 기계공학과(공학박사)
- 1991년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
자동화설계, 메카트로닉스응용, 유압시스템최적화

주 영 철(Young-Cheol Joo)

[정회원]



- 1984년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학사)
- 1986년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : University of California, Los Angeles (공학박사)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 부교수

<관심분야>
열유체, MEMS, RP, 자동차

김 국 원(Kug-Weon Kim)

[정회원]



- 1988년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1990년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : 서울대학교 기계설계학과(공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 조교수

<관심분야>
정밀가공, 전산역학, 제품설계

이 상 욱(Sang-Wook Lee)

[정회원]



- 1986년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1988년 2월 : 한국과학기술원 생산공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 부교수

<관심분야>

소성가공, 전산역학, 연료전지 등